



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARIA LUISA ALMEIDA LACERDA

**EFEITO DE CICLOS DE DEGRADAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA NA RESISTÊNCIA
MECÂNICA EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS REFORÇADAS COM
FIBRAS DE POLIÉSTER**

CRATEÚS

2026

MARIA LUISA ALMEIDA LACERDA

EFEITO DE CICLOS DE DEGRADAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA NA RESISTÊNCIA
MECÂNICA EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRAS
DE POLIÉSTER

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Heloína Nogueira
da Costa.

CRATEÚS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L138e Lacerda, Maria Luisa Almeida.
Efeito de ciclos de degradação físico-química na resistência mecânica em argamassas geopoliméricas reforçadas com fibras de poliéster / Maria Luisa Almeida Lacerda. – 2026.
58 f.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2026.
Orientação: Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa.
1. Argamassas geopoliméricas. 2. Reforço com fibras. 3. Degradação. I. Título.
- CDD 620
-

MARIA LUISA ALMEIDA LACERDA

EFEITO DE CICLOS DE DEGRADAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA NA RESISTÊNCIA
MECÂNICA EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRAS
DE POLIÉSTER

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Heloína Nogueira da Costa (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng^o Civil Iuri Veríssimo Mendonça
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng^o Civil Marcella Maria Gomes Damasceno
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por sempre ter me mantido forte, com coragem e saúde para trilhar essa trajetória árdua e repleta de desafios que é a jornada acadêmica.

Aos meus pais, Maria de Fátima e Francisco Glevane, por sempre acreditarem e confiarem em mim com a certeza de que não os decepcionei. Obrigada por não medirem esforços para me proporcionarem sempre o melhor. Amo vocês.

Ao meu irmão, Pedro Levi, por ter sido meu porto seguro mesmo quando não fazia ideia. Obrigada por todos os carinhos, apelidos e até mesmo discussões. Não existe a “Isa” sem você.

À minha avó, Antônia Albertina, por ser minha segunda mãe e ter me ensinado tantos valores que hoje carrego com muito orgulho e gratidão.

Agradeço à minha Orientadora Heloína Nogueira da Costa, primeiramente pela oportunidade da monitoria na bolsa PID que me abriu portas e um olhar diferente para a área de materiais e, segundo, por ter aceitado me orientar na produção desse trabalho pelo qual desenvolvi um grande apego e que, sem dúvidas, me fez admirar ainda mais a área de materiais de construção. Enalteço a grande profissional que é e sempre a terei como fonte de inspiração.

Gostaria de agradecer aos meus colegas de laboratório Arthur Breno, Nayra Rocha, Olavo, Lucas Braga, Eduarda Prudente e Sanatiel, por todo apoio durante a produção deste trabalho, a ajuda de vocês foi crucial para o seu desenvolvimento.

Aos meus amigos e parceiros de faculdade durante estes 5 anos: Ana Beatriz, Kelviane, Paulo José e Fabrício. A jornada até aqui sem vocês não faria sentido, obrigada por todos os momentos de apoio, conversas, estudos e, principalmente, risadas. Tenho certeza de que o processo se tornou menos doloroso por ter tido vocês comigo. Eu amo vocês.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal do Ceará, por terem feito parte e estarem presentes nessa conquista.

Por fim, agradeço imensamente à Universidade Federal do Ceará - Campus Crateús por ter sido minha segunda casa e ter me aberto tantas portas até a realização desse grande sonho. Carregarei sempre comigo o orgulho de ter feito parte desta instituição.

“Às estrelas que ouvem e aos sonhos que são atendidos.”

RESUMO

Atualmente a indústria cimenteira é responsável por uma quantidade significativa de emissão de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera devido à alta demanda de consumo do cimento Portland comum (CPC). Sua produção faz uso do clínquer, causando assim a liberação de CO_2 . Uma alternativa sustentável de substituição do CPC são materiais álcali-ativados (MAA) formados pela mistura de um precursor sólido com uma solução alcalina. Portanto, o presente estudo tem o objetivo de analisar a resistência mecânica de argamassas geopoliméricas reforçadas com fibras de poliéster antes e após a imersão em soluções agressivas. Dessa maneira, foram produzidos seis tipos de misturas variando os teores de precursores de metacaulim e pó de vidro reciclado para dois teores do reforço de fibra e, através de ciclos de molhagem e secagem, as argamassas foram imersas em soluções contendo água (H_2O), cloreto de sódio (NaCl) e sulfato de magnésio (MgSO_4). Para a produção das argamassas utilizou-se uma solução ativadora composta por silicato de sódio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sódio (NaOH) de concentração de 6M e uma razão ativador/precursor fixada em 0,8, a razão entre ligante e areia foi 1:2. O ensaio do índice de consistência foi realizado para determinação da trabalhabilidade das argamassas através da mesa de consistência. Para o estado endurecido realizou-se o rompimento para análise da resistência à compressão das amostras aos 7 e 28 dias, assim como o rompimento à tração na flexão, aos 28 dias, para corpos de prova prismáticos. O mesmo ensaio de resistência à compressão também foi realizado para as amostras após os ciclos de degradação nas soluções agressivas. Nos resultados do ensaio fresco das argamassas geopoliméricas o diâmetro do espalhamento tende a aumentar quando o teor de fibra incorporada é menor, com 0,1% de adição. Na resistência à compressão, as amostras com maior teor de metacaulim tendem a apresentarem maiores resistências, chegando a valores de 50,35 MPa aos 7 dias e 57,33 MPa aos 28 dias. O mesmo ocorre para análise dos valores obtidos à tração na flexão. Além destes dados, foi possível analisar que a imersão das amostras em soluções agressivas ocasionou o surgimento de eflorescência nos corpos de prova com a presença de manchas esbranquiçadas e até produção de sais na superfície para àquelas imersas em MgSO_4 . Os rompimentos à compressão após os ciclos apresentaram ganho de resistência para as amostras imersas em sulfato de magnésio e perda para às que foram testadas em cloreto de sódio.

Palavras-chave: Argamassas geopoliméricas; soluções agressivas; fibras de poliéster; metacaulim; pó de vidro reciclado.

ABSTRACT

Currently, the cement industry is responsible for a significant amount of carbon dioxide (CO₂) emissions into the atmosphere due to the high demand for ordinary Portland cement (OPC). Its production makes use of clinker, thus causing the release of CO₂. A sustainable alternative to replace OPC is alkali-activated materials (AAMs), formed by the mixture of a solid precursor with an alkaline solution. Therefore, the present study aims to analyze the mechanical strength of geopolymer mortars reinforced with polyester fibers before and after immersion in aggressive solutions. Thus, six types of mixtures were produced by varying the contents of metakaolin and recycled glass powder for two fiber reinforcement contents, and through wetting and drying cycles, the mortars were immersed in solutions containing water (H₂O), sodium chloride (NaCl), and magnesium sulfate (MgSO₄). For the production of the mortars, an activating solution composed of sodium silicate (Na₂SiO₃) and sodium hydroxide (NaOH) with a concentration of 6 M was used, and an activator-to-precursor ratio fixed at 0.8; the binder-to-sand ratio was 1:2. The consistency index test was carried out to determine mortar workability using a flow table. For the hardened state, compressive strength tests were performed to analyze the compressive strength of the samples at 7 and 28 days, as well as flexural tensile strength tests at 28 days for prismatic specimens. The same compressive strength test was also performed for the samples after the degradation cycles in aggressive solutions. In the fresh-state results of the geopolymer mortars, the flow diameter tended to increase when the incorporated fiber content was lower, with 0.1% addition. Regarding compressive strength, samples with higher metakaolin content tended to present higher strength values, reaching 50.35 MPa at 7 days and 57.33 MPa at 28 days. The same behavior was observed for the analysis of flexural tensile strength values. In addition to these data, it was possible to analyze that the immersion of the samples in aggressive solutions caused the appearance of efflorescence on the specimens, with the presence of whitish stains and even salt formation on the surface of those immersed in MgSO₄. Compressive strength after the cycles showed strength gains for the samples immersed in magnesium sulfate and losses for those tested in sodium chloride.

Keywords: Geopolymer mortars; aggressive solutions; polyester fibers; metakaolin; recycled glass powder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de procedimentos.....	17
Figura 2 - Produção de argamassa álcali-ativada em laboratório.....	23
Figura 3 – Argamassa álcali-ativada moldada em fôrmas acrílicas.....	23
Figura 4 - Ensaio de determinação do índice de consistência.....	24
Figura 5 - Realização do ensaio de resistência à compressão e corpos de prova rompidos à tração na flexão.....	25
Figura 6 - Recipientes contendo soluções de H ₂ O, NaCl e MgSO ₄ , respectivamente com CPs imersos.....	26
Figura 7- Consistência da argamassa antes e após aplicação de golpes na mesa de consistência, respectivamente.....	29
Figura 8 - Surgimento de sais na superfície de amostra da mistura 4 após imersão.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do Metacaulim.....	17
Tabela 2 - Composição química do pó de vidro reciclado.....	18
Tabela 3 - Caracterização da areia.....	19
Tabela 4 - Composição da fibra.....	20
Tabela 5 - Especificação das misturas produzidas com variação no teor de precursores e fibra..	21
Tabela 6 – Ciclos de ensaios.....	25

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
1.1. Objetivo geral.....	7
1.2. Objetivos específicos.....	7
1.3. Estrutura do trabalho.....	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
2.1. Materiais álcali-ativados.....	9
2.2. Precursores.....	10
2.3. Ativação alcalina.....	13
2.4. Compósitos reforçados com fibras.....	15
2.5. Durabilidade.....	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1. <i>Materiais.....</i>	<i>17</i>
3.1.1. <i>Metacaulim.....</i>	<i>17</i>
3.1.2. <i>Pó de vidro reciclado.....</i>	<i>18</i>
3.1.3. <i>Areia natural.....</i>	<i>19</i>
3.1.4. <i>Fibras de poliéster reciclado.....</i>	<i>20</i>
3.2. Materiais ativadores.....	21
3.3. Métodos.....	21
3.3.1. <i>Preparo da mistura.....</i>	<i>21</i>
3.4. Ensaio realizados.....	23
3.4.1. <i>Determinação do índice de consistência.....</i>	<i>23</i>
3.4.2. <i>Resistência à compressão e à tração na flexão.....</i>	<i>24</i>
3.4.3. <i>Ciclos de degradação em soluções agressivas.....</i>	<i>25</i>
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1. Ensaio de determinação do índice de consistência.....	28
4.2. Resistência à compressão e à tração na flexão antes da imersão na soluções.....	30
4.3. Ciclos de degradação em soluções agressivas.....	32
4.3.1. <i>Inspeção visual das amostras ao longo dos ciclos.....</i>	<i>33</i>
4.4. Resistência à compressão e à tração na flexão após os ciclos de degradação.....	39
5. CONCLUSÃO.....	41
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

1. INTRODUÇÃO

O uso de materiais cimentícios utilizados para união de elementos na construção remonta às obras egípcias, quando misturas de gesso calcinado eram feitas para formarem uma liga que endurecia e apresentava aderência entre os componentes unidos (Hewlett, 2003). Mais tarde, em 1824, a prática de calcinação de um calcário misturado com argila e moído para ser reduzido a um fino pó ganhou o nome de “cimento Portland”, patenteado pelo pedreiro britânico Joseph Aspdin (Aspdin, 1824). Na indústria da construção civil este produto tornou-se uma prática trivial, sendo o principal responsável pela produção de argamassas e concretos utilizados em diversas atividades de construção. Segundo Nidheesh e Kumar (2019), estima-se que a produção média de concreto, atualmente, por pessoa por ano seja cerca de uma tonelada.

Com a grande demanda de utilização de cimento, acompanha-se as consequências de sua fabricação, como a emissão de dióxido de carbono (CO_2) no seu processo de produção devido às altas temperaturas e matéria-prima utilizada, o que estima-se a liberação de cerca de 0,73 a 0,85 toneladas desse gás para cada tonelada de cimento Portland produzido (He *et al.*, 2019). O CO_2 é o gás responsável pelo efeito estufa no planeta e constantemente novas técnicas de sustentabilidade vêm sendo desenvolvidas e implementadas a fim de reduzir seu lançamento na atmosfera.

Diante dessa problemática destaca-se a necessidade e importância de estudos e desenvolvimento de cimentos eco eficientes que indicam um processo de produção com baixo teor de emissão de gases nocivos ao ambiente ao mesmo tempo em que apresentam propriedades mecânicas satisfatórias para o seu desempenho. Os Materiais álcali-ativados (MAA) são um exemplo de prática sustentável que reduz a liberação de gases do efeito estufa (Mohajerani, *et al.*, 2019) através da redução da relação clínquer/cimento.

Os MAA são formados pela junção de um ativador alcalino com um precursor sólido (aluminossilicato), este podendo ser subproduto da fabricação de materiais como ferro gusa, que produz as escórias (Miyamoto *et al.*, 2015), da queima de carvão mineral que gera as cinzas volantes (Lima *et al.*, 2022) ou ainda da calcinação de minerais argilosos, como a caulinita, obtendo-se o metacaulim (Rashad, 2013). O processo de produção dos precursores exige menor liberação de gases na atmosfera em decorrência de etapas de calcinação realizadas a temperaturas significativamente menores em relação à produção do cimento Portland convencional (Bavuzo, 2017).

A notoriedade da mistura de um aluminossilicato com uma solução alcalina se deu pelo fato de o material formado apresentar taxas de resistência à compressão semelhantes às do cimento Portland, popularmente utilizado (Provis; Van Deventer, 2014) e ainda assim conseguir reduzir os impactos gerados. Os precursores mais comuns, atualmente utilizados na produção desse tipo de composição são a escória de alto forno e o metacaulim, resultando em MAA ecologicamente corretos (Severo *et al.*, 2013).

Todavia, ainda que os cimentos álcali-ativados se apresentem como potenciais substitutos do cimento Portland convencional atendendo ao quesito de resistência aos esforços (Provis; Van Deventer, 2014), um estudo aprofundado acerca da exposição de MAA à condições ambientais de degradação, como ciclos de molhagem e secagem, contribuem para a avaliação e comprovação da eficiência de implementação destes materiais alternativos ao cimento Portland comum.

Segundo Zhang *et al.* (2017) a utilização de concretos convencionais em ambientes agressivos pode ser acometida da presença de carbonatação e/ou ataques por cloretos, fatores estes ligados à permeabilidade do material e sua absorção de água, do mesmo modo concretos produzidos à base de cimentos álcali-ativados estão sujeitos a tais fatores críticos. Portanto, torna-se relevante a realização de um estudo que analisa tanto as propriedades mecânicas como também a análise visual de materiais álcali-ativados após exposição em condições que simulam ambientes com condições agressivas, contribuindo assim para o conhecimento acerca da durabilidade destes materiais.

1.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o processo de degradação físico-química de argamassas álcali-ativadas reforçadas com fibras em ciclos de exposição à agentes agressivos.

1.2. Objetivos específicos

- 1) Obter argamassas geopoliméricas reforçadas com fibras com características de trabalhabilidade e resistência mecânica adequadas;
- 2) Avaliar o comportamento mecânico das argamassas geopoliméricas antes e após os ciclos de degradação em soluções agressivas;
- 3) Avaliar o comportamento das argamassas em ciclos de degradação em solução contendo cloreto de sódio;

- 4) Avaliar o comportamento das argamassas em ciclos de degradação em solução contendo sulfato de magnésio.

1.3. Estrutura do trabalho

A primeira seção denominada de introdução disserta quanto à problemática da utilização em larga escala do cimento Portland comum e como o seu processo de produção afeta significativamente o efeito estufa através da alta liberação de dióxido de carbono na atmosfera. Também apresenta os objetivos e a estrutura do trabalho. A segunda seção, de referencial teórico, aborda a origem dos primeiros tipos de materiais álcali-ativados e seus objetivos de utilização, contextualizando sua evolução ao longo dos anos, apresentando suas composições químicas e propriedades. Os principais tipos de precursores também são discutidos, assim como o processo de ativação alcalina e seus ativadores, o reforço realizado com fibras e os aspectos da durabilidade dos materiais álcali-ativados quando comparados aos métodos convencionais já utilizados.

A terceira seção apresenta os procedimentos metodológicos, isto é, quais materiais foram utilizados nesta pesquisa, suas características físicas, origem e composição. Esta seção também apresenta os métodos de preparo para as misturas, os ensaios realizados e o processo de realização dos ciclos de molhagem e secagem das amostras como forma de avaliação das propriedades físicas e mecânicas das argamassas álcali-ativadas.

O quarto tópico apresenta e discute todos os resultados obtidos nos ensaios das amostras das argamassas, tanto em seu estado fresco quanto endurecido, e as considerações relevantes acerca das amostras que passaram pelo processo de molhagem e secagem em soluções consideradas agressivas aos materiais.

Por fim, são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do programa experimental e as referências bibliográficas utilizadas para embasar o estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Materiais álcali-ativados

A descoberta dos primeiros tipos de materiais alternativos ao cimento Portland se deu na antiga União Soviética, na década de 1950, com as pesquisas do cientista ucraniano Victor Glukhovsky acerca da ativação alcalina de diferentes solos naturais e resíduos industriais para a produção dos chamados “cimentos de solo” (Ponomar, Luukkonen, & Yliniemi, 2023; Kryvenko, 2017). Todavia, os estudos de reações álcali-ativadas tiveram um grande impulso em 1972, quando o francês e pesquisador Joseph Davidovits voltou suas pesquisas à produção de materiais desenvolvidos através de reações de hidratação de aluminossilicatos com soluções alcalinas: os geopolímeros (Severo *et al.*, 2013). A possibilidade de utilização de outros ativadores para a produção de MAA também foi desenvolvida por Glukhovsky a partir da década de 1960, apresentando alguns sais de sódio como soluções alcalinas (Malone, Randall, Kirkpatrick, 1985). O estudo intensivo desse tipo de reação para a produção de cimento tem sido muito presente nas últimas décadas devido ao impacto ambiental positivo, assim como, os excelentes desempenhos apresentados em comparação ao cimento convencional.

A estrutura desses materiais compósitos é baseada na reação entre precursores sólidos ricos em aluminossilicatos com ativadores alcalinos. A natureza dos precursores é derivada de subprodutos e resíduos industriais que incluem escória granulada de alto-forno, escória de fósforo granulada, escória de aço, cinzas volantes de carvão, metacaulim, sílica ativa, dentre outros (Shi; Jiménez; Palomo, 2011). De modo geral, a depender das matérias-primas e condições dos procedimentos de sua formação, os materiais álcali-ativados podem apresentar diferentes propriedades e características satisfatórias, como elevada resistência à compressão, menor tempo de cura e baixa retração, que os apresentam como enorme potencial a serem alternativas ao cimento Portland comum. Além disso, podem ser apresentados com diferentes nomenclaturas dependendo da sua composição, tais como: geopolímeros, geocimentos, cimentos ativos alcalinamente, concreto de polímero inorgânico (Severo *et al.*, 2013).

Materiais álcali-ativados são determinados através de sua nanoestrutura a depender do teor de cálcio. Para os sistemas com baixo teor de cálcio, por exemplo, apresenta-se uma rede tridimensional em sua formação, denominando-os como geopolímeros. Cadeias com alto e intermediário teores de cálcio também podem ocorrer (Provis, 2014). O surgimento dos geopolímeros se deu após Davidovits começar a investigar novos materiais resistentes ao

calor após uma sequência intensa de incêndios catastróficos na França que envolviam plásticos orgânicos inflamáveis. Assim, o pesquisador registrou a patente dos geopolímeros ao desenvolvê-los como materiais inorgânicos não-inflamáveis e resistentes ao fogo (Severo *et al.*, 2013).

Um sistema como o dos geopolímeros, ou seja, com baixo teor de cálcio, são definidos como um gel de aluminossilicato caracterizado por uma estrutura tridimensional que apresenta desarranjo de médio e longo alcance, tornando-o assim amorfo aos raios-X (Fernández-Jiménez; PALOMO, 2005). Sistemas como esse produzem um gel que recebe a nomenclatura abreviada N-A-S-H ($\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$), pois geralmente apresenta uma estrutura molecular com sua rede tridimensional construída por tetraedros de silicato e aluminato que são interligados por átomos de oxigênio, com íons alcalinos que balanceiam a carga (Duxson *et al.*, 2005). O ativador sólido utilizado neste caso deve ser de elevado pH, como silicatos e hidróxidos, que seja capaz de dissolver a parcela amorfa do precursor sólido. Os principais precursores dos geopolímeros são a cinza da combustão de carvão mineral e o metacaulim (Longhi, 2015).

Sistemas de materiais álcali-ativados com alto teor de cálcio, com precursores como a escória de alto forno, são nomeados C-A-S-H, denominados por um gel de hidrato aluminossilicato de cálcio que apresenta certa semelhança à estrutura do gel que resulta da hidratação do cimento Portland, o silicato de cálcio hidratado, abreviado como C-S-H (Provis, 2014; Bernal *et al.*, 2014). Acerca do modelo estrutural C-S-H, a relação Ca/Si pode variar a estrutura a depender do aumento ou não dessa razão, ou seja, a presença de materiais ricos em Si, por exemplo, diminui essa relação o que gera um aumento no comprimento da cadeia. De forma análoga, à medida que há um aumento na razão Al/Si e menor razão Ca/Si, Al é incorporado na estrutura formando o gel C-A-S-H. Materiais desenvolvidos com teor de cálcio intermediário também podem se formar pela coexistência dos géis N-A-S-H e C-A-S-H ao serem produzidos com a combinação de dois precursores sólidos como escória de alto forno e cinza volante ou escória de alto forno e metacaulim. Essa combinação gera géis denominados C-(N)-A-S-H (Costa; Cabral; Nogueira, 2022).

2.2. Precursores

O amplo estudo de geopolímeros e materiais álcali-ativados obteve avanço significativo nas últimas décadas não somente pela descoberta de um meio alternativo ao cimento Portland, mas também pela disponibilidade, reatividade, custo e valor que os

precursores apresentam ao serem uma classe de materiais versátil e localmente adaptável. A promoção de materiais álcali-ativados deve acontecer como uma opção ambientalmente correta, com isso, o transporte de materiais utilizados no processo deve ser minimizado, fazendo com que o foco esteja no desenvolvimento e utilização de materiais disponíveis localmente como precursores de ligantes álcali-ativados (Provis, 2018). A redução da emissão de gases nocivos à atmosfera é um fator positivo em se tratando do ambientalmente correto, porém além desse aspecto o uso de determinados ligantes alcalinos também apresentam este benefício ao utilizarem subprodutos industriais como precursores, como é o caso das cinzas volantes, escória de alto-forno, sílica ativa, metacaulim, dentre outros (Ibrahim; Maslehuddin, 2021). Estes subprodutos que normalmente não são úteis para incorporação de cimento Portland podem ser utilizados na produção de MAA, apresentando assim economia de recursos naturais que agrega no processo de sustentabilidade da indústria da construção civil (Provis; Van Deventer, 2014).

As cinzas volantes são subprodutos da queima de carvão mineral em usinas termelétricas e são produzidas pela fusão em alta temperatura e um resfriamento rápido, apresentando assim uma quantidade significativa de sílica amorfa e alumina (Zhou *et al.*, 2025). A produção de cinzas volantes por usinas de carvão representa um número considerável de 800Mt anualmente, quantidade essa que configura um desafio para seu manejo e descarte (Horvatinec *et al.*, 2025), desse modo destaca-se a preferência do reaproveitamento em grandes quantidades deste subproduto (Puthipad *et al.*, 2016).

O processo de geopolimerização é baseado na cadeia de alumina-silicato, o que torna as cinzas volantes aptas a serem utilizadas como matérias-primas na produção de materiais álcali-ativados uma vez que os silicatos se dissolvem com o contato entre cinza volante e solução alcalina (Görhan; Kürklü, 2014). Em comparação com os subprodutos do processo de fabricação do ferro: as escórias granuladas de alto forno, as cinzas volantes apresentam baixa reatividade o que implica em uma menor resistência mecânica quando analisado somente este aspecto de maneira isolada. Contudo, fatores quanto às propriedades mecânicas dos ligantes compostos de cinzas volantes e escórias ativados por álcalis são influenciadas por vários fatores, incluindo a proporção de cinzas volantes para escória, dosagem e concentração do ativador, entre outros (Zhou *et al.*, 2025).

Segundo Özbay, Erdemir e Durmuş (2016, p. 424) “a escória de alto-forno é um subproduto adquirido na produção de ferro-gusa no alto-forno e envolve essencialmente

silicatos e aluminossilicatos de cálcio e de outras bases...”. O processo de formação desse precursor acontece juntamente com o ferro (Fe) após uma etapa de alta temperatura na produção de ferro-gusa, que acaba elevando a escória até a superfície onde a mesma é resfriada, transformando-se em um silicato vítreo (Özbay; Erdemir; Durmuş, 2016). Em um estudo recente Zhang, Wang e Wu (2025) destacaram fatores importantes quanto ao tipo de resfriamento aplicado às escórias que são definidos em dois processos: resfriamento rápido e lento. Os autores citam o primeiro tipo como o mais adequado a tornar as escórias substitutas diretas do clínquer no cimento, isso devido a formação de uma estrutura vítrea no processo, enquanto que por resfriamento lento o resultado apresentado é uma menor reatividade química que limita seu valor a aplicações secundárias e específicas como o uso para pavimentação.

A composição química deste precursor varia conforme a sua origem, o que o caracteriza como material cimentício ou não. A depender da presença de maiores ou menores percentuais de determinados compostos óxidos, as escórias de alto forno apresentarão sua basicidade e capacidade hidráulica (Cabrera-Madrid; Escalante-García; Castro-Borges, 2016). Em complemento, a utilização deste subproduto como substituto do clínquer na produção de argamassas álcali-ativadas é um exemplo de ecologia industrial que apresenta resultados de redução de cerca de 22% nas emissões de CO₂ para cada 40% de escória de alto-forno que substitui o cimento Portland (Özbay; Erdemir; Durmuş, 2016).

Dentre as opções de precursores para produção de argamassas álcali-ativadas o metacaulim, uma argila metaestável altamente reativa a soluções alcalinas e originada da calcinação do caulim, gera como produto final um geopolímero de elevada resistência mecânica (Alonso; Palomo, 2001; Pacheco-Torgal *et al.*, 2008). Esta característica ganha ainda mais destaque devido ao seu aumento quando os MAA produzidos à base de metacaulim, utilizam o silicato e hidróxido de sódio em sua solução alcalina adquirindo aumento de resistência mecânica tanto à compressão como à flexão (Severo *et al.*, 2013). Alonso e Palomo (2001) explicam ainda que através de sua ativação alcalina acontece a formação de um material amorfo (aluminossilicato alcalino) que é o responsável pela propriedade de alta resistência mecânica mesmo em pequenas idades após um processo de cura térmica suave.

A produção de metacaulim como precursor de materiais álcali-ativados vem de um mineral industrial que, quando exposto ao processo de calcinação em condições favoráveis,

gera uma pozolana natural com propriedades cimentícias que pode ser utilizada na produção de geopolímeros (Rashad, 2013). Em seu estudo, Rashad (2013) apresenta as diferentes condições quanto ao processo ideal de calcinação do caulim, concluindo assim que um processo com temperatura variando de 700-900 °C em um período de 6h produz um material que aumenta sua resistência à medida que essa temperatura cresce dentro desse intervalo. Essa análise reafirma o impacto ambiental positivo ao se produzir MAA, que apresentam menores emissões de dióxido de carbono quando comparadas com a produção do clínquer, que necessita de temperaturas que variam de 1250-1400°C (Wang *et al.*, 2024).

Uma alternativa de utilização como precursor parcial na produção de geopolímeros que também vem ganhando notoriedade é o pó de vidro reciclado (PVR), oriundo da trituração de vidro reciclado de garrafas de bebidas (Zhang; He; Poon, 2020). Sua fabricação e uso para produção de materiais álcali-ativados contribui no avanço da solução da problemática acerca destes materiais descartados em larga escala. O PVR pode ser utilizado como substituto parcial dos precursores convencionais de modo que garanta a vantagem ambiental ao reutilizar estes materiais reciclados assim como melhores aspectos como a durabilidade de MAA (Ali *et al.*, 2023). A pesquisa de Ali *et al.* (2023) descreve o pó de vidro reciclado como um material de baixa reatividade e, por este motivo, é preferível sua utilização como uma incorporação à outros precursores em dosagens estratégicas do que como um precursor isolado. Sua composição nos MAA contribui para a durabilidade do material e boa resistência mecânica.

Segundo Yang *et al.* (2021, p.11): “o vidro residual adicionado resulta na formação de uma estrutura de gel mais densa nas amostras de geopolímero à base de metacaulim”, essa estrutura em questão provém uma menor presença de poros devido ao maior preenchimento dos vazios internos resultando em um material com maior durabilidade, já que a presença de agentes agressivos é dificultada (Yang *et al.*, 2021). Com base na pesquisa recente de Ali *et al.* (2023), em amostras à base de escória granulada de alto-forno, a incorporação de PVR torna-se uma alternativa de controle da eflorescência reduzindo cerca de 540% da ocorrência dessa manifestação patológica quando incorporado 75% de pó de vidro na produção das pastas de escória.

2.3. Ativação alcalina

Os materiais álcali-ativados, como mencionado, são formados pelo processo de ativação alcalina, ou seja, quando os precursores entram em contato com os ativadores

alcalinos e passam por fases de reações que geram como produto final a pasta cimentícia em questão estudada (Severo, 2013). Os principais ativadores alcalinos utilizados como aceleradores do processo de reações mais comumente utilizados são hidróxido de sódio (NaOH), como ativador de álcalis, e o silicato de sódio (Na_2SiO_3) como solução de silicato de metais alcalinos (El Fadili *et al.*, 2025).

Segundo Severo (2013), dois modelos de ativação alcalina podem ocorrer a depender do tipo de precursor utilizado, podendo ser ele caulínítico no qual serão liberados elementos de Al e Si, ou precursores de maior teor de cálcio como as escórias de alto-forno que liberam Ca e Si em seu processo de ativação alcalina. O autor discute ainda quanto aos tipos de ativadores, como os a base de silicato que levam à produção de um material com maior resistência à compressão devido ao produto de reação com maior teor de Si, e ativadores de soluções de hidróxidos alcalinos, estes não adicionando sílica ao sistema (Severo, 2013).

O hidróxido de sódio é uma base forte que é produzida industrialmente e possui elevada alcalinidade, o que contribui para a dissolução dos precursores dos MAA e facilita a hidrólise da rede vítrea inicial, contudo uma elevada concentração desse ativador pode levar ao surgimento de eflorescência nos materiais produzidos (Guo *et al.*, 2023). O hidróxido de sódio é o ativador mais utilizado, sua solução é preparada em água e é um processo exotérmico, ou seja, libera calor durante seu preparo, além disso seu processamento é corrosivo e deve ser realizado com os devidos cuidados. O hidróxido de potássio (KOH) também é uma opção de ativador, porém devido o seu maior custo e menor disponibilidade em relação ao NaOH, não é amplamente utilizado (Costa, 2022).

Além da utilização de ativadores a base de hidróxidos, o uso de silicatos também é uma opção de ativadores alcalinos, sendo o silicato de sódio o mais popular e utilizado, proveniente da calcinação do carbonato de sódio e areia sílica (Lin; Zhang; Yang, 2023). O Na_2SiO_3 apresenta-se como um material viscoso e seu processo de dissolução não libera calor, diferente do NaOH (Costa, 2022). Com base nos estudos de Lin, Zhang e Yang (2023), soluções de silicato de sódio podem se tornar mais reativas quando a razão de Si/M varia entre 0,5 e 1, o que contribui para despolimerização da solução, além disso a combinação desse ativador com o hidróxido de sódio promove ainda mais esse processo por reduzir o valor da razão molar.

2.4. Compósitos reforçados com fibras

Fibras de diferentes composições podem ser incorporadas na produção de MAA a depender da razão de utilização de sua incorporação, seja aumento da resistência, controle de retração ou até mesmo maior resistência dos materiais à altas temperaturas (Ranjbar; Zhang, 2020). Compósitos reforçados com fibras normalmente são uma alternativa para uma melhora nas propriedades mecânicas do material, mais especificamente sua resistência a esforços de tração, uma vez que o reforço auxilia no controle da propagação de fissuras/trincas a serem formadas no material devido ações externas ou reações internas da própria matriz (Ranjbar *et al.*, 2016). As fibras têm diferentes materiais podendo variar de fibras metálicas como as de aço e carbono, por exemplo, até fibras não metálicas como as inorgânicas, e a escolha certa de qual usar na incorporação do MAA deve levar em conta aspectos como a aplicação, relação fibra-matriz e propriedades de ambos (Ranjbar; Zhang, 2020).

A estrutura dos materiais álcali-ativados e/ou geopolímeros comumente expressa resultados de resistência à compressão satisfatórios, podendo apresentar valores de 25,85 MPa aos 28 dias (Silva *et al.*, 2023) ou ainda, quando produzidos com mais de um precursor como metacaulim e pó de vidro residual, os valores de resistência média à compressão podem aumentar, chegando até 37,9 MPa aos 56 dias e, a depender da formulação pode ultrapassar 70 MPa já aos 28 dias (Tchakouté *et al.*, 2016). Contudo, valores menores são obtidos ao submeter os MAA a ensaios de resistência à tração ou à flexão, podendo estar relacionados ao processo de retração sofrido pelo material com o tempo, ocasionando assim o surgimento de microfissuras no material (Ranjbar *et al.*, 2016).

Uma boa relação fibra-matriz torna um material mais resistente aos esforços devido a distribuição de tensões repassadas da matriz cimentícia do geopolímero para as fibras incorporadas (Alomayri, 2017). Quando distribuídas de maneira uniformemente dispersas, as fibras garantem um melhor desempenho, ao contrário do acúmulo de fibras em regiões específicas do material, que acaba ocasionando o efeito contrário ao objetivo da sua adição, ou seja, menor resistência do material (Menger, 2018).

2.5. Durabilidade

Os estudos desenvolvidos por Glukhovsky acerca da formação de materiais álcali-ativados utilizando precursores locais permitiu, na década de 1960, que o até então intitulado “Instituto de Pesquisa Científica para Materiais e Agregados V.D Glukhovsky”

iniciasse uma série de construções utilizando escória de alto-forno álcali-ativadas, que desenvolveram estruturas de diferentes portes, desde edifícios residenciais e blocos pré-moldados até canais de irrigação e trechos de estrada. Estudos posteriores com amostras extraídas dos elementos revelaram materiais com alta durabilidade, todavia devido a impasses linguísticos e demais problemas, o acesso às normas desenvolvidas acerca da escória utilizada não se tornou acessível ao resto do mundo (Ponomar; Luukkonen; Yliniemi, 2023).

É de conhecimento comum que para o cimento Portland convencional (CPC), os fatores críticos que degradam e comprometem as estruturas são a carbonatação, o ataque por sulfatos e a penetração de cloretos. Estes fatores estão relacionados a duas características dos materiais envolvidos: a absorção de água e permeabilidade (Zhang *et al.* 2017). Sabe-se que, quanto à sua resistência mecânica, os materiais álcali-ativados apresentam, de fato, propriedades equivalentes ou melhores que a do cimento convencional (Ibrahim; Maslehuddin, 2020) e quanto à resistência aos fatores de degradação, Zhang *et. al* (2017) encontrou uma maior resistência à carbonatação dos MAA, bem como maior resistência à sulfatos quando comparados ao CPC. Contudo, os resultados podem variar, a depender da formulação utilizada, por isso, estudos da durabilidade a longo prazo destes materiais expostos a ambientes agressivos são recomendados pelos autores a fim de um conhecimento mais aprofundado quanto à sua estrutura.

A incorporação de fibras nos MAA surgem como uma proposta de melhora das propriedades estruturais e, em virtude da distribuição e transmissão de tensões da matriz do elemento cimentício para as fibras incorporadas, o material ganha tanto maior resistência como, conseqüentemente, maior durabilidade em razão do controle da proliferação de microfissuras que possam aparecer no material (Menger, 2018), ou seja, as fibras funcionam como uma ponte entre as aberturas, impedindo assim tanto a sua propagação como a facilidade de penetração de agentes agressivos que podem comprometer a integridade do geopolímero (Farhan; Johari; Demirboğa, 2022). Experimentos de Farhan, Johari e Demirboğa (2022) expuseram materiais álcali-ativados reforçados com fibras curtas (6mm) e longas (12mm) a sulfatos e obtiveram resultados de boa resistência à compressão mesmo após o contato com os agentes agressivos assim como não apresentaram sinais de deterioração, a não ser por manchas esbranquiçadas na superfície formadas pelo carbonato de sódio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O resumo do procedimento pode ser analisado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma de procedimentos



Fonte: Autora (2025).

As argamassas álcali-ativadas foram produzidas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC) - Campus de Crateús enquanto que os ensaios de rompimento à compressão e flexão foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFC – Campus do Pici, em Fortaleza/CE. Os ciclos de molhagem e secagem foram realizados no laboratório de materiais da UFC - Campus de Crateús após os primeiros 28 dias de cura dos corpos de provas (CPs). Após esse período, os CPs foram imersos em soluções, por meio de ciclos de molhagem e secagem, por 28 dias.

3.1. Materiais

3.1.1. Metacaulim

O metacaulim foi o principal precursor utilizado na produção das argamassas álcali-ativadas, sendo de origem industrial e comercializado pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda. Na Tabela 1, observa-se as composições químicas deste material disponibilizadas pelo fabricante.

Tabela 1 - Composição química do Metacaulim

Componentes	% de óxidos
-------------	-------------

SiO_2	57,0
Al_2O_3	34,0
$CaO + MgO$	< 0,1
SO_3	< 0,1
Na_2O	< 0,1
Na_2O eq.	< 1,5
Fe_2O_3	2,0
TiO_2	1,5

Fonte: Metacaulim do Brasil (2016).

Com base nos dados da composição química do metacaulim, calcula-se aproximadamente a razão $SiO_2/Al_2O_3 \approx 1,68$. A finura é representada pelos 6% de material retido na peneira #325 (45 μm), ou seja, o metacaulim utilizado é de elevada finura e atende aos requisitos da NBR 15894-1, que estabelece uma porcentagem mínima de finura < 10%. A massa específica do precursor é de 2560 kg/m³ e sua área superficial BET é 23,0 m²/g (Metacaulim Do Brasil Indústria e Comércio Ltda., s.d.).

3.1.2. *Pó de vidro reciclado*

O pó de vidro utilizado foi fornecido pela empresa Eco Engenharia e Distribuição e apresenta a composição química presente na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do pó de vidro reciclado

Componentes	Conc. unitária (%)
Al_2O_3	0,833
SiO_2	69,5
K_2O	0,470
CaO	17,1

MgO	1,91
Fe_2O_3	4,19
Na_2O	4,06
P_2O_5	1,25
SO_3	0,290
Cl	0,0353
Cr_2O_3	0,225
Rb_2O	0,0265
SrO	0,0623
ZrO_2	0,0233

Fonte: Autora (2025).

A partir dos dados da composição química do precursor fornecido, pode-se obter uma aproximação da a razão $SiO_2/Al_2O_3 \simeq 83,43$.

3.1.3. Areia natural

A areia natural de leito de rio foi utilizada como agregado miúdo na produção das argamassas. A caracterização deste agregado miúdo foi obtida por ensaios realizados com base em normas vigentes e estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização da areia

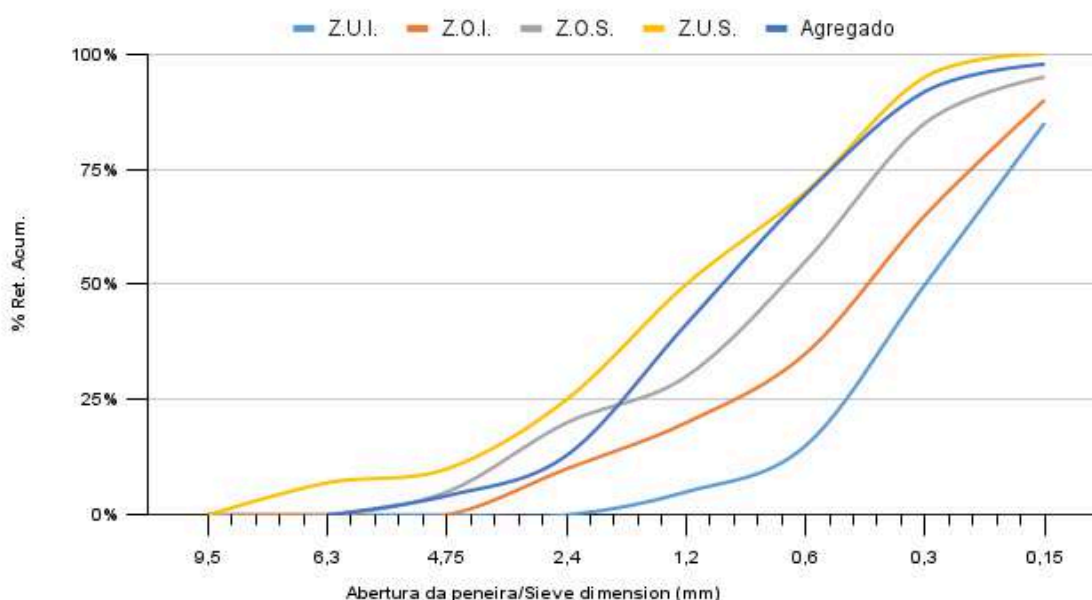
Ensaio realizado	Resultados obtidos	Normas vigentes
Massa unitária média (kg/m ³)	1,39	ABNT NBR 16972:2021
Massa específica média (kg/m ³)	2,604	ABNT NBR 16916:2021
Média de material pulverulento (%)	1,2	ABNT NBR NM 16973:2021
Teor de argila e friáveis (%)	1,25	NBR 7218:2010
Dimensão máxima característica - D.M.C (mm)	4,75	ABNT NBR 17054:2022

Módulo de finura	4,17	ABNT NBR 17054:2023
------------------	------	------------------------

Fonte: TORRES, Ellen Mirley Medeiros (2026).

No Gráfico 1 a curva granulométrica da areia é traçada contendo as porcentagens de Zona utilizável - Limites inferior e superior (Z.U.I. e Z.U.S, respectivamente) e Zona ótima - limites inferior (Z.O.I) e superior (Z.O.S.), além das porcentagens do agregado miúdo utilizado no ensaio.

Gráfico 1 – Curva granulométrica da areia



Fonte: TORRES, Ellen Mirley Medeiros (2026).

3.1.4. *Fibras de poliéster reciclado*

O reforço com fibras nas argamassas álcali-ativadas foi realizado para melhoria de propriedades mecânicas e físicas. A fibra de poliéster utilizada é comercializada pela empresa EcoFábril Indústria e Comércio Ltda. A composição do material foi obtida através de sua ficha técnica e é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição da fibra

Componentes	Concentração (%)
Poliéster	99,5

Óleo de encimagem	0,5
-------------------	-----

Fonte: EcoFábril Indústria e Comércio Ltda (2017).

O comprimento das fibras têm uma variação de comprimento de 20 - 100 mm e variação de título de 0,9 - 18 dtex (decitex). Essas características são importantes para a compreensão do impacto do uso desse reforço nos compósitos quanto à fatores como trabalhabilidade, relação fibra-matriz e dispersão da fibra.

3.2. Materiais ativadores

Os materiais ativadores utilizados foram o hidróxido (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3), o primeiro sendo disposto inicialmente em micropérolas com 98,5% de pureza e densidade de 2,130 g/cm³, preparado em água para produção de uma solução com concentração de 6 mol/L. O silicato de sódio comercial utilizado apresenta densidade de 1,583 g/cm³ com composição química de 15% Na₂O, 33% SiO₂ e 53% H₂O.

3.3. Métodos

3.3.1. Preparo da mistura

As misturas têm proporção fixa, em massa, de 1:2:0,8 (precursores:areia:solução) com a relação da solução ativadora igual a 1 composta por silicato de sódio e hidróxido de sódio de concentração molar igual a 6M. Os fatores variáveis do estudo são teor de precursores, aumentando a quantidade de metacaulim e diminuindo a porcentagem de pó de vidro reciclado, juntamente com a utilização de dois teores de adição de fibras para cada mistura produzida, com a Tabela 5 é possível analisar as misturas.

Tabela 5 - Especificação das misturas produzidas com variação no teor de precursores e fibra

Nº	Misturas	Metacaulim (%)	Pó de vidro reciclado (%)	Fibra de poliéster reciclado (%)	Razão ativador/precursor
1	M70V30F0,1	70	30	0,1	0,8
2	M70V30F0,2	70	30	0,2	0,8
3	M80V20F0,1	80	20	0,1	0,8
4	M80V20F0,2	80	20	0,2	0,8
5	M90V10F0,1	90	10	0,1	0,8
6	M90V10F0,2	90	10	0,2	0,8

Fonte: Autora (2025).

A produção das misturas utilizou como equipamento misturador a betoneira de 120 L do laboratório de materiais de construção do Campus de Crateús, a preferência pela máquina se deu pela praticidade do acréscimo das fibras de poliéster, evitando seu enroscamento nas pás do equipamento, garantindo uma boa incorporação e melhor dispersão pela matriz.

A primeira etapa do processo consiste no preparo da solução de NaOH, que ocorre 24h antes da realização da mistura por se tratar de uma solução exotérmica, visando assim sua estabilização térmica para utilização. Após a pesagem de todos os materiais, procedeu-se com a composição manual dos dois precursores (metacaulim e pó de vidro reciclado), garantindo sua composição homogênea, bem como a composição, em um béquer, dos ativadores alcalinos (NaOH e Na_2SiO_3). Ao início do processo, a betoneira foi previamente umedecida com uma adição de água e uma pequena quantidade de silicato de sódio. Em seguida, os precursores foram adicionados e um terço da solução alcalina foi acrescentada, com isso o equipamento foi acionado e iniciou-se o processo de homogeneização da pasta inicial, seguida da adição do segundo terço da solução alcalina. Ao tempo de 1,5 min de betoneira ligada, adicionou-se a areia e, logo após, a quantidade final de solução. As fibras foram sendo incorporadas durante todo o processo de produção e pausas por volta dos 6 min e 15 min foram realizadas para raspagem da betoneira e mistura manual, com auxílio de uma colher de pedreiro, da argamassa a fim de desfazer os aglomerados produzidos. Todas as misturas apresentaram um tempo total de produção em torno de 20 min de processamento. Observa-se o processo através da Figura 2.

Figura 2 - Produção de argamassa álcali-ativada em laboratório



Fonte: Autora (2025).

Os corpos de prova foram moldados em fôrmas acrílicas de dimensões 4 cm x 4 cm x 4 cm e 4 cm x 4 cm x 16 cm, como observa-se na Figura 3, com o objetivo de realização dos ensaios no estado endurecido.

Figura 3 – Argamassa álcali-ativada moldada em fôrmas acrílicas.



Fonte: Autora (2025).

O desmolde das amostras se deu após 24h, no laboratório de materiais. Assim, os corpos de prova mantiveram-se em cura em temperatura ambiente.

3.4. Ensaio realizado

3.4.1. Determinação do índice de consistência

O ensaio realizado no estado fresco das argamassas é o de determinação do índice de consistência, realizado conforme a ABNT NBR 13276 (2016) utilizando a mesa de

consistência. O preenchimento do cone ocorre em três camadas seguidas com alturas próximas ou iguais, para cada camada preenchida foram realizadas as aplicações de quinze, dez e cinco golpes, respectivamente, e o rasamento no topo do molde foi realizado. Em seguida o cone foi retirado e 30 golpes foram aplicados na mesa no tempo de 30 segundos. As leituras do diâmetro de espalhamento foram realizadas com um paquímetro em três eixos diferentes e logo em seguida uma média foi retirada. A Figura 4 corresponde à realização dos procedimentos do ensaio.

Figura 4 - Ensaio de determinação do índice de consistência



Fonte: Autora (2025).

3.4.2. Resistência à compressão e à tração na flexão

O estado endurecido das argamassas acontece após o seu processo de cura e permite a realização de ensaios que avaliem suas propriedades mecânicas como a resistência à tração e/ou compressão. Baseado nos procedimentos da ABNT NBR 13279 (2005), o ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma Máquina Universal de Ensaios EMIC DL30000N do LMCC, utilizando três corpos de prova (4cm x 4cm x 4cm), para cada mistura aos 7 e 28 dias após a moldagem. Para os três corpos de prova de dimensões 4cm x 4cm x 16 cm o ensaio, aos 28 dias, foi realizado inicialmente à tração na flexão e, posteriormente, com cada a metade do CP rompido, realizou-se mais dois ensaios de resistência à compressão. A Figura 5 ilustra os ensaios realizados.

Figura 5 - Realização do ensaio de resistência à compressão e corpos de prova rompidos à tração na flexão



Fonte: Autora (2025).

3.4.3. Ciclos de degradação em soluções agressivas

A análise de durabilidade das amostras de argamassas álcali-ativadas reforçadas com fibras foi avaliada com o procedimento de ciclos de molhagem e secagem que expuseram os corpos de prova a soluções contendo água (H_2O), cloreto de sódio ($NaCl$) e sulfato de magnésio ($MgSO_4$), ambientes estes que remetem a condições ambientais de leve a elevadas agressividades às quais os materiais podem estar expostos.

Tabela 6 – Ciclos de ensaios

Procedimento	Solução	Período
Molhagem e secagem	H_2O	28 dias
Molhagem e secagem	$NaCl$	28 dias
Molhagem e secagem	$MgSO_4$	28 dias

Fonte: Autora (2025).

Após a idade de 28 dias de cura de cada argamassa em temperatura ambiente do laboratório, em torno de $\pm 23^\circ C$, 9 corpos de prova foram separados e expostos às soluções durante os ciclos, sendo 3 corpos de prova para cada solução. O ensaio tem duração total de 28 dias, contabilizando 4 ciclos, onde 1 ciclo representa o período de 6 dias de imersão dos CPs nas soluções e 1 dia de secagem em temperatura ambiente, procedimento adaptado de

Nasrollahzadeh e Rostami (2025). Cada ciclo é repetido até completar o período e assim, as amostras são rompidas à compressão para análise de suas propriedades mecânicas e verificação do efeito de cada solução na resistência à compressão.

As soluções de cloreto de sódio e sulfato de magnésio foram preparadas no laboratório de materiais de construção civil do Campus de Crateús. Para a primeira solução, o NaCl tem grau reagente de 3% (massa/volume) baseado em estudos de durabilidade de materiais expostos à ambientes marinhos (Wardhono *et al.*, 2023), portanto foram pesadas 36g de NaCl para sua dissolução em 1,2 L de água destilada. A mistura foi realizada em um béquer com auxílio de um bastão de vidro e posteriormente transferida para o recipiente onde os corpos de prova foram imersos. Após a imersão das amostras os recipientes são devidamente tampados para evitar a evaporação da solução.

Para a dissolução do sulfato de magnésio, a concentração utilizada foi de 10% para ataques externos por sulfatos em materiais álcali-ativados (Kanaan *et al.*, 2023), assim foram pesadas 120g de sulfato de magnésio anidro para dissolução em 1,2 L de água destilada para produção da solução. O procedimento se deu da mesma forma para a dissolução do cloreto de sódio, que também foi transferido para um recipiente para receber os CPs. A Figura 6 ilustra os recipientes de cada solução com alguns corpos de prova já imersos.

Figura 6 - Recipientes contendo soluções de H₂O, NaCl e MgSO₄, respectivamente com CPs imersos



Fonte: Autora (2025).

Os ciclos de molhagem e secagem objetivam a inspeção visual das argamassas álcali-ativadas reforçadas com fibras quando expostas em condições ambientais agressivas. Após cada etapa do ciclo, ou seja, semanalmente, os corpos de prova foram monitorados quanto à ocorrência de eflorescência ou qualquer outra deterioração que os CPs possam ter

sofrido. Assim, registros fotográficos também foram realizados para fins comparativos ao fim dos ciclos.

É importante destacar que não houve padronização no registro fotográfico realizado devido a questões de logística para o rompimento do material, uma vez que antes do rompimento, os corpos de prova eram transportados até o LMCC do campus do Pici para ensaio, inviabilizando assim a uniformização desta etapa.

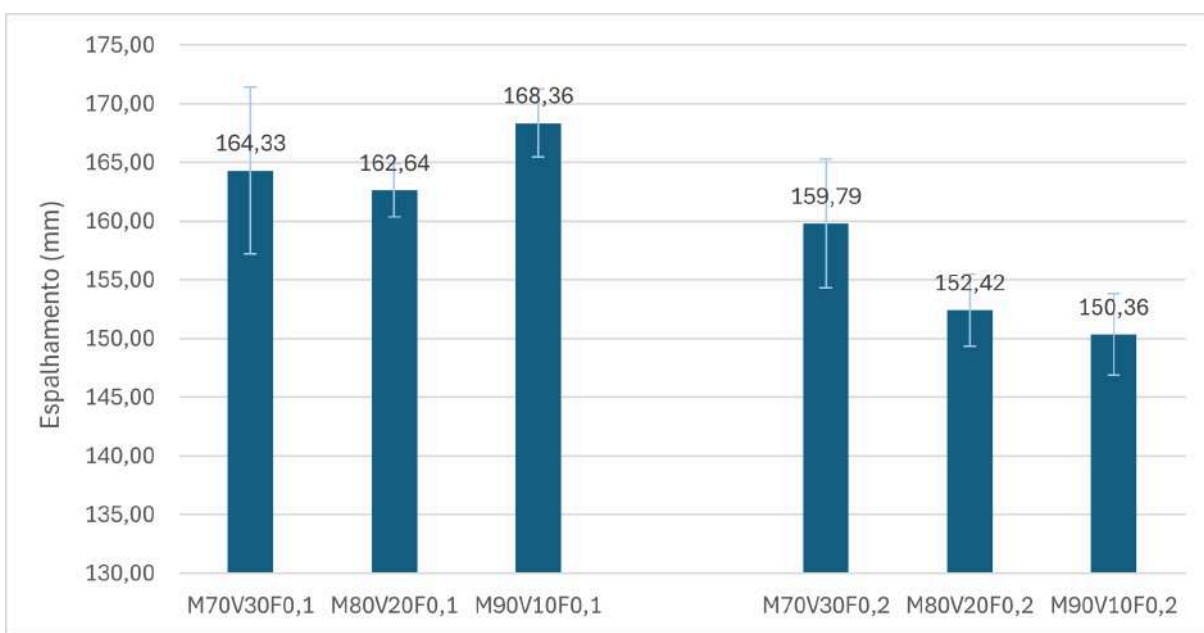
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, os resultados são apresentados e discutidos para o devido entendimento quanto ao comportamento das argamassas álcali-ativadas reforçadas com fibras de poliéster reciclado. Em seu estado fresco é possível analisar a variação da consistência a depender da composição dos materiais empregados, da mesma forma as propriedades mecânicas podem ser avaliadas tanto antes da imersão nos ciclos de degradação como após a exposição às soluções agressivas.

4.1. Ensaio de determinação do índice de consistência

Observa-se no Gráfico 2 o índice de consistência e plasticidade das argamassas por meio do diâmetro de espalhamento. As misturas que contém o menor teor de fibras apresentam maior diâmetro de espalhamento, indicando melhor trabalhabilidade, como as composições 1, 3 e 5, conforme numerado na Tabela 5.

Gráfico 2 - Índice de consistência das argamassas



Fonte: Autora (2025).

Após a retirada do cone, as argamassas não demonstraram abatimento (Figura 7a), contudo, após a aplicação dos 30 golpes na mesa de consistência, o espalhamento da argamassa ocorreu (Figura 7b), esse comportamento reforça o quanto a presença das fibras tende a unir o compósito mesmo ainda em seu estado fresco.

Figura 7- Consistência da argamassa antes e após aplicação de golpes na mesa de consistência, respectivamente



(a)

(b)

Fonte: Autora (2025).

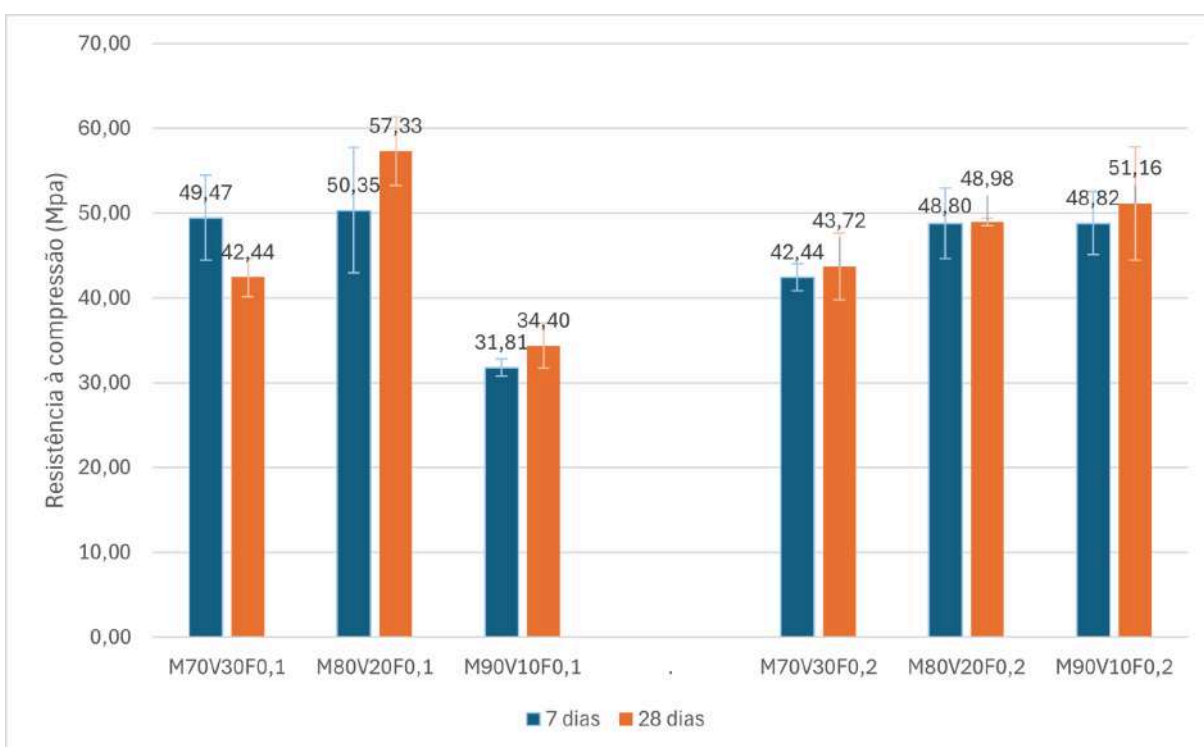
Segundo Carvalho et. al (2024), maiores teores de pó de vidro apresentam melhor trabalhabilidade das argamassas, fator este podendo estar relacionado à menor absorção de água das partículas deste precursor alternativo. Por outro lado, a maior presença de metacaulim ocasiona o efeito contrário, ou seja, reduz a trabalhabilidade das argamassas tanto devido ao formato lamelar das suas partículas como à elevada área superficial (Gasperi, 2021). Em análise ao Gráfico 1 esta tendência tende a acontecer, exceto para a mistura 5 (M90V10F0,1) que apresentou valor de espalhamento elevado e fora dos padrões indicados pela literatura citada, indicando possíveis alterações no processo de produção da mistura que ocasionaram divergência nos resultados e, devido à questões logísticas e de tempo, a produção desta mistura não pôde ser refeita.

Os dados obtidos possibilitaram concluir que a incorporação de fibra tem influência direta na consistência das argamassas geopoliméricas. A redução da trabalhabilidade das argamassas com maior teor de fibras ocorre devido a maior aglomeração deste reforço, e com o aumento da sua rede de contato dentro da matriz, uma vez que sua incorporação limita a movimentação da argamassa (Farhan; Johari; Demirboğa, 2022; Ranjbar; Zhang, 2020).

4.2. Resistência à compressão e à tração na flexão antes da imersão na soluções

A determinação da resistência à compressão dos corpos de prova antes dos ciclos de molhagem e secagem foi realizada nas idades de 7 e 28 dias, respectivamente. O Gráfico 3 corresponde à variação de resistências obtidas alterando os teores de fibras e os teores dos precursores.

Gráfico 3 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias



Fonte: Autora (2025).

Com os resultados do Gráfico 3, identifica-se que os maiores valores obtidos, em ambas as idades, foram os da mistura 3 (M80V20F0,1), composta por 80% metacaulim, 20% pó de vidro reciclado e com o menor teor de fibras de poliéster, contendo 0,1% de adição, apresentando a resistência aos 7 dias de 50,35 MPa e aos 28 dias de 57,33 MPa.

As menores resistências encontradas foram as da mistura 5 (M90V10F0,1) com 31,81 MPa e 34,4 MPa, aos 7 e 28 dias, respectivamente. Estes valores se destacam por se apresentarem abaixo da média de resistência encontrada nas demais misturas, até mesmo em comparação com a composição 6 (M90V10F0,2) que contém as mesmas porcentagens de adição dos precursores, variando somente o teor de fibras. Segundo os estudos de Carvalho et. al (2024) esse comportamento está incoerente, pois esperava-se que ocorresse um aumento da

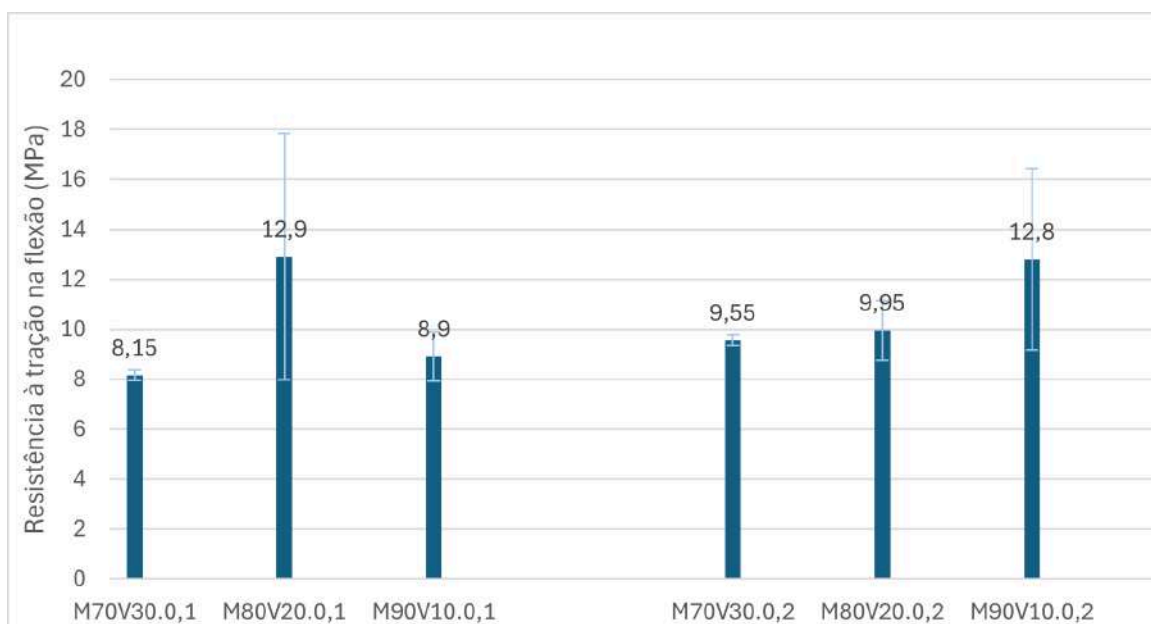
resistência à compressão para as misturas com menores teores de pó de vidro e maior incorporação de metacaulim. A menor área superficial do pó de vidro ocasiona uma menor reatividade das partículas deste material, portanto quanto maior o teor de vidro sem dosagem adequada, mais partículas de pó de vidro tendem a não reagir ocasionando alteração e diminuindo as propriedades mecânicas das argamassas (SI *et al.*, 2020).

No Gráfico 3 percebe-se ainda que, em exceção à mistura 5, a redução na quantidade de pó de vidro reciclado para um mesmo teor de fibras adicionadas tende a manter na mesma faixa de resistência, aumentando levemente a resistência para as misturas com 0,1% de fibras, como visto compósito 1 (M70V30F0,1) com resistência aos 7 dias de 49,97 MPa e a mistura 3 (M80V20F0,1) com 50,35 MPa. O mesmo acontece para as misturas com a maior porcentagem de fibras, igual a 0,2%, como a mistura 2 (M70V30F0,2) com 42,44 MPa, a mistura 4 (M80V20F0,2) com 48,80 MPa e a mistura 6 (M90V10F0,2) apresentando 48,82 MPa.

Por outro lado, a literatura também aponta que o uso de pó de vidro reciclado quando dosado corretamente, contribui para a melhoria das propriedades mecânicas do geopolímero em comparação ao uso do metacaulim como precursor isolado, isso devido a maior relação Si/Al do pó de vidro que aumenta a quantidade de ligações Si-O-Si da mistura (SI *et al.*, 2020). Além disso, sua utilização contribui para produção de uma argamassa eco eficiente e ecologicamente correta ao utilizar material proveniente de reciclagem.

O maior teor de fibras incorporadas tende a diminuir a resistência à compressão das argamassas. Essa alteração pode ter ocorrido devido a maior aglomeração de fibras no material, dificultando a aderência adequada entre o reforço adicionado e a matriz. Esse fenômeno pode acarretar na formação de nichos quando a fibra não é bem distribuída. Contudo, quando adicionada em quantidade adequada e bem distribuída as fibras apresentam-se como excelente reforço das propriedades mecânicas garantindo maior resistência à tração e também controle no surgimento de microfissuras no material (Alomayri, 2017). A resistência à tração na flexão das argamassas pode ser vista no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Resultados de ensaio à tração na flexão das argamassas



Fonte: Autora (2025).

A partir do Gráfico 4 é possível analisar, novamente, o comportamento inesperado da mistura 5 (M90V10F0,1) ao apresentar valores de resistência à tração na flexão inferiores ao esperado para misturas com maior incorporação de metacaulim. Nas amostras com 0,2% de adição de fibra observa-se a tendência esperada de aumento da resistência à tração na flexão quando o teor de vidro diminui e mais metacaulim é utilizado. Quanto às misturas com menores teores de fibra, a análise da mistura 3 (M80V20F0,1) em comparação com a mistura 4 (M80V20F0,2) apresenta coerência quanto à influência negativa de um maior teor de fibras para a resistência, como discutido nos resultados de resistência à compressão. Contudo, o mesmo não ocorre para as misturas 1 (M70V30F0,1) e 2 (M70V30F0,2) que apresentaram o efeito contrário, com a maior resistência à tração na flexão sendo apresentada na amostra com 0,2% de fibra.

4.3. Ciclos de degradação em soluções agressivas.

Os resultados dos ciclos de molhagem e secagem foram obtidos através da inspeção visual quanto ao surgimento de possíveis fissuras, manchas esbranquiçadas, corrosão superficial e até deterioração do material.







4.3.1. Inspeção visual das amostras ao longo dos ciclos.













A inspeção visual das amostras ao longo dos ciclos foi realizada com o objetivo de registrar possíveis alterações nos corpos de prova durante os períodos de imersão e secagem, como surgimento de fissuras, eflorescência, manchas ou deterioração do material.

É importante destacar que não houve padronização no registro fotográfico realizado devido a questões de logística para o rompimento do material, uma vez que antes do rompimento, os corpos de prova eram transportados até o LMCC do campus do Pici para ensaio, inviabilizando assim a uniformização desta etapa. Contudo, as alterações mais relevantes e significativas dos materiais foram registradas e serão apresentadas e discutidas a seguir.

A primeira análise a ser realizada será dos corpos de prova imersos somente em água, assim, no Quadro 1, é possível visualizar as amostras que mais apresentaram variações ao longo dos ciclos e suas respectivas formulações. Alguns corpos de prova sofreram alterações logo após ser retirado da imersão e levemente seco, denominado nas imagens de “pós imersão” seguido do respectivo ciclo (C1, por exemplo, para ciclo 1), enquanto que outros demonstraram mudanças somente após o período de 24h de secagem, denominado nas imagens de “pós secagem”.

Quadro 1 - Corpos de prova com alterações superficiais após ciclos de imersão em H₂O

Misturas			
M70V30F0,1 (1)			
	Pós secagem - C1	Pós secagem - C2	Pós secagem - C3
M70V30F0,2 (2)			
	Pós secagem - C1	Pós secagem - C2	Pós secagem - C3

M80V20F0,1 (3)	 Pós secagem - C1	 Pós secagem - C2	 Pós secagem - C3
M80V20F0,2 (4)	 Pós secagem - C1	 Pós secagem - C2	 Pós secagem - C3
M90V10F0,1 (5)	 Pós secagem - C1	 Pós secagem - C2	 Pós secagem - C3
M90V10F0,2 (6)	 Pós secagem - C1	 Pós secagem - C2	 Pós secagem - C3

Fonte: Autora (2025).







Verifica-se que a principal alteração nos corpos de prova encontra-se geralmente entre o primeiro (C1) e segundo ciclo (C2) de secagem com o surgimento de manchas esbranquiçadas bem marcadas, como é o caso do primeiro corpo de prova apresentado na mistura 1 (M70V30F0,1) onde a variação de coloração apareceu logo após a imersão de 6 dias em água e um dia de secagem, e ainda no C1. Porém observa-se, na mesma mistura, que na terceira imagem representando o C3 do mesmo corpo de prova, o aspecto esbranquiçado do material tornou-se mais suavizado após 3 ciclos. O corpo de prova 1 da mistura 6













(M90V10F0,2) foi o que mais apresentou depósitos esbranquiçados, surgidos no C2. Com a comparação das imagens é possível perceber que ao decorrer dos ciclos, as amostras tendem a manter uma neutralidade em sua coloração e os aspectos das manchas suavizam-se. É importante destacar que os registros fotográficos dos ciclos 4 (C4) não puderam ser apresentados uma vez que o processo de logística de transporte dos CPs não permitiu um registro de melhor qualidade para análise em comparação com as demais amostras.

O aspecto visual detectado caracteriza-se como eflorescência nas amostras submetidas à imersão em água, que ocorre através do transporte de álcalis livres da matriz até a superfície, onde reagem com o CO_2 da atmosfera formando assim os depósitos esbranquiçados, resultado da cristalização dos sais alcalinos (Longhi *et al.*, 2020). Isso explica o porquê de algumas amostras já apresentarem essa característica logo após ser retirada da solução.

O Quadro 2 contém todas as imagens das amostras imersas em solução de cloreto de sódio, destacando os corpos de prova com variações visuais mais significativas. A mistura 3 (M80V20F0,1), diferente das demais amostras, foi submetida a 6 ciclos de molhagem e secagem, totalizando 2 ciclos a mais, devido novamente à questões de logística de agendamento de transporte dos corpos de prova do Campus de Crateús para o LMCC no Campus do Pici, assim possíveis alterações na mistura em questão se dá por tal fator.

Quadro 2 - Corpos de prova com alterações superficiais após ciclos de imersão em NaCl
















Misturas			
M70V30F0,1 (1)			
	Pós secagem - C1	Pós secagem - C2	Pós secagem - C3
M70V30F0,2 (2)			
	Pós secagem - C1	Pós secagem - C2	Pós secagem - C3

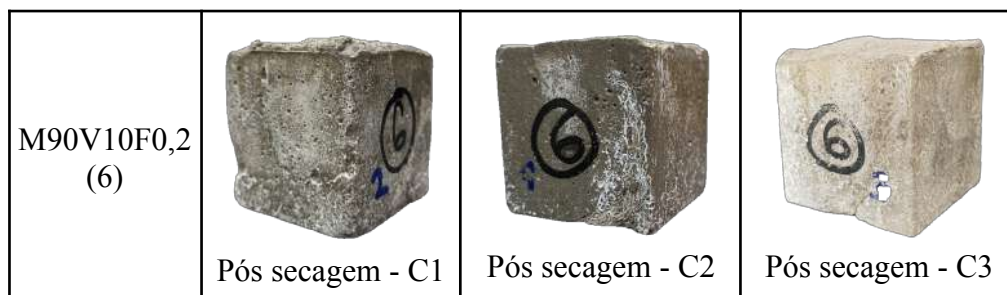
M80V20F0,1 (3)			
Pós secagem - C1	Pós secagem - C2	Pós secagem - C3	
M80V20F0,2 (4)			
Pós secagem - C1	Pós secagem - C2	Pós secagem - C3	
M90V10F0,1 (5)			
Pós secagem - C1	Pós secagem - C2	Pós secagem - C3	
M90V10F0,2 (6)			
Pós secagem - C1	Pós secagem - C2	Pós secagem - C3	

Fonte: Autora (2025).

As características observadas neste caso são semelhantes às do Quadro 1, ou seja, é evidente o surgimento de eflorescência nos corpos de prova, principalmente no primeiro ciclo. A intensidade do fenômeno pode ser influenciada por fatores como o precursor utilizado, que define características da microestrutura, assim como o ativador alcalino e sua concentração, dentre outros fatores (ZHANG *et al.* 2017). O Quadro 3 ilustra as amostras imersas na última solução agressiva desse estudo.

Quadro 3 - Corpos de prova com alterações superficiais após ciclos de imersão em $MgSO_4$

Misturas			
M70V30F0,1 (1)	 <p>Pós secagem - C1</p>	 <p>Pós secagem - C2</p>	 <p>Pós secagem - C3</p>
M70V30F0,2 (2)	 <p>Pós secagem- C1</p>	 <p>Pós secagem - C2</p>	 <p>Pós secagem - C3</p>
M80V20F0,1 (3)	 <p>Pós secagem - C1</p>	 <p>Pós secagem - C2</p>	 <p>Pós secagem - C3</p>
M80V20F0,2 (4)	 <p>Pós secagem - C1</p>	 <p>Pós secagem - C2</p>	 <p>Pós secagem - C3</p>
M90V10F0,1 (5)	 <p>Pós secagem - C1</p>	 <p>Pós secagem - C2</p>	 <p>Pós secagem - C3</p>



Fonte: Autora (2025).

Analisando as imagens do Quadro 3, observa-se que o surgimento da eflorescência se torna bem mais presente após a imersão em solução de sulfato de magnésio. Além das manchas esbranquiçadas, é possível observar algumas amostras com escurecimento, como as da mistura 5 e 6.

A formação de sais na superfície do material também puderam ser observadas logo após a primeira etapa de imersão de 6 dias em solução, como ilustra a Figura 8.

Figura 8 - Surgimento de sais na superfície de amostra da mistura 4 após imersão



Fonte: Autora (2025).

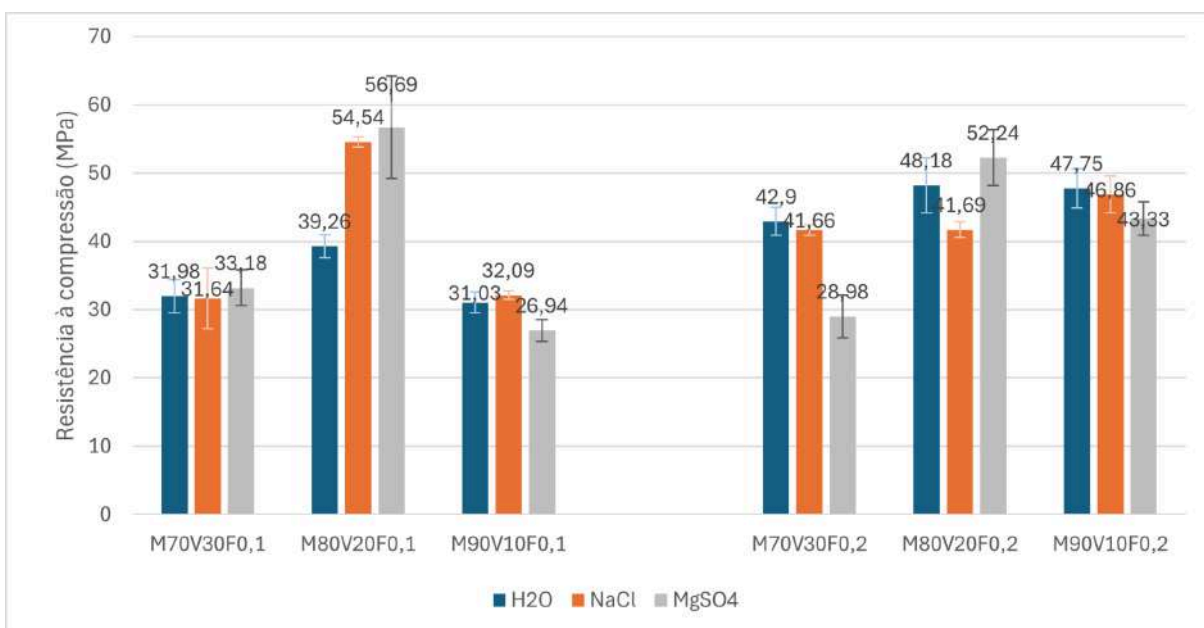
A formação desses depósitos de sais pode ser explicada pela cristalização dos sais solúveis presente no material após a sua imersão, que são produtos da lixiviação dos íons sulfatos pela matriz, produzindo a sua formação na superfície da amostra. A degradação dos corpos de prova imersos em sulfato de magnésio apresentam-se mais agressivas do que nas duas soluções anteriores. Contudo, os geopolímeros à base de metacaulim apresentam-se como materiais resistentes ao ataque de sulfatos, isso era esperado conforme preconiza a literatura, a formulação com metacaulim geralmente é mais resistente ao ataque de sulfatos do

que os demais materiais álcali-ativados ou compósitos de cimento Portland convencional (LI *et al.*, 2024).

4.4. Resistência à compressão e à tração na flexão após os ciclos de degradação

O ensaio de resistência à compressão, Gráfico 5, também foi realizado nos corpos de prova que passaram pelos ciclos de degradação físico-químico de molhagem e secagem em soluções agressivas. Os ciclos tiveram duração de 28 dias e, no último dia do processo, os corpos de prova foram rompidos. A mistura 3 (M80V20F0,1) não pôde ser rompida ao fim dos 4 ciclos de imersão (28 dias) devido à logística de agendamento e transporte dos corpos de prova até o LMCC do Campus do Pici, com isso suas amostras passaram por 6 ciclos de molhagem e secagem e foram rompidos aos 42 dias, podendo apresentar variação nos resultados de seu ensaio.

Gráfico 5 - Análise da resistência à compressão após imersão dos corpos de prova em soluções agressivas



Fonte: Autora (2026).

No Gráfico 5 identifica-se, novamente, que a mistura 3 (M80V20F0,1) segue sendo a que apresenta os maiores valores de resistência à compressão mesmo tendo passado por mais ciclos de degradação nas soluções. Realizando um comparativo entre os corpos de prova das soluções imersas em água, que sofreram somente ciclo físico, com aqueles submetidos ao cloreto de sódio e sulfato de magnésio, é possível observar que as misturas com 80%

metacaulim e 20% pó de vidro obtiveram um ganho de resistência após o ataque por MgSO_4 , esse fator está ligado à formação de uma estrutura zeólita estável após incorporação adequada do metacaulim, o que pode aumentar a resistência das amostras (ZHANG *et al.* 2017). Além disso, o pó de vidro reciclado também possui uma influência positiva ao ser incorporado uma vez que sua natureza impermeável reduz a absorção de soluções químicas (SIDDIKA *et al.*, 2021).

Nas amostras com maior teor de fibra, é observada uma tendência de redução da resistência à compressão dos CPs expostos à solução de cloreto de sódio quando comparados aos imersos em água, o que está de acordo com a literatura pois a diminuição desta propriedade mecânica é resultado da cristalização dos sais que preenchem os poros da matriz após a imersão e tende a gerar tensões internas acarretando em uma menor resistência à compressão (JIAO *et al.*, 2023).

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho possibilitou a análise da resistência mecânica de argamassas geopoliméricas produzidas variando os teores de precursores, metacaulim e pó de vidro reciclado, juntamente com a variação do teor de fibras de poliéster incorporadas como reforço. A partir dos resultados dos ensaios realizados as principais conclusões são:

- O índice de consistência das amostras indicou melhor trabalhabilidade para as misturas contendo o menor teor de fibra, com 0,1% de adição. O aumento na incorporação das fibras tende a reduzir a consistência;
- A resistência à compressão das misturas antes dos ciclos de degradação apresenta valores mais elevados para os corpos de prova contendo menor adição de fibra, chegando até a 57,33 MPa, aos 28 dias, como é o caso da mistura 3 (M80V20F0,1). Em exceção, a mistura 5 (M90V10F0,1) apresentou valores abaixo da média obtida, contrariando a literatura quanto aos resultados esperados;
- A incorporação de maiores quantidades de metacaulim apresenta uma tendência de aumento na resistência à compressão das argamassas, assim como a quantidade adequada de pó de vidro reciclado como precursor alternativo na mistura;
- Com os ciclos de degradação das misturas, identificou-se que para todos os corpos de prova imersos nas soluções agressivas houve o surgimento de eflorescência, identificado através dos depósitos esbranquiçados presentes na superfície das amostras. A solução de $MgSO_4$ apresentou-se como a mais agressiva com o surgimento de sais em algumas amostras logo após o período de 6 dias de imersão;
- A resistência à compressão das amostras após a imersão em solução de $MgSO_4$ apresentou um aumento, quando comparadas aos CPs imersos em água, para as misturas com 80% metacaulim e 20% pó de vidro. Já as misturas submetidas à solução de NaCl apresentaram queda na sua resistência à compressão.

De modo geral, o metacaulim e o pó de vidro apresentam-se como excelentes precursores para melhoria da resistência mecânica dos geopolímeros, assim como a incorporação de fibras de poliéster, em quantidades corretas, tendem a agregar nas resistências da argamassa, podendo chegar a resistências mecânicas acima de 50 MPa mesmo após a imersão em soluções agressivas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, Hafiz Asad; SUN, Keke; XUAN, Dongxing; LU, Jian-Xin; CYR, Martin; POON, Chi Sun. **Recycling of high-volume waste glass powder in alkali-activated materials: An efflorescence mitigation strategy**. *Journal of Building Engineering*, v. 65, p. 105756, 2023. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105756.

ALOMAYRI, T. The microstructural and mechanical properties of geopolymer composites containing glass microfibres. **Ceramics International**. v. 43, p. 4576-4582, 2017.

ALONSO, S.; PALOMO, A. Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. **Materials Letters**. Elsevier, v. 47, p. 55-62, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X00002123>

ASPDIN, Joseph. **Improvements in the modes of producing an artificial stone**. GB Patent No. 5022, Reino Unido, 21 jul. 1824. Disponível em: <https://www.cementkilns.co.uk/patents/5022.pdf>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972: Agregados — Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16973: Agregados — Determinação do material fino que passa pela da peneira 75 µm por lavagem**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7218: Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da retenção de água**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554: Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio.** 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15839: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos: Caracterização reológica pelo método squeeze-flow.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916: Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054: Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2022.

BAUER, Elton; SOUSA, José Getúlio Gomes; GUIMARÃES, Elvio Andrade. Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS**, 6., 2005, Florianópolis. Anais

[...]. Florianópolis: [s.n.], 2005. p. 95–105. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/314389525>.

BAVUZO, Luiggi Teixeira. **Desempenho de compósitos álcali-ativados reforçados com fibra de PVA**. 2017. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

BERNAL, S. A.; NICOLAS, R.S.; MYERS, R.J.; GUTIÉRREZ, R.M.; PUERTAS, F.; VAN DEVENTER, J.S.J.; PROVIS, J.L. MgO content of slag controls phase evolution and structural changes induced by accelerated carbonation in alkali-activated binders. **Cement and Concrete Research**, v. 57, p. 33–43, 2014.

CABRERA-MADRID, J. A.; ESCALANTE-GARCÍA, J. I.; CASTRO-BORGES, P. Resistência à compressão de concretos com escória de alto-forno: Revisão do estado da arte. **Alconpat**, México, v. 6, n. 1, p. 72–84, 2016. Disponível em: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352016000100064&tlng=pt.

CARVALHO, Ivo C.; CHAVES, André R.; ARAÚJO, Clédson L.; COSTA, Heloína N.; CABRAL, Antônio E. B. **Mechanical, rheological, and microstructural study of ternary alkali-activated pastes using BOF slag, metakaolin, and glass powder as precursors**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Reston, v. 36, 14 p., 2024. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-17132.

COSTA, Heloína Nogueira da. Cimento álcali-ativado à base de cinzas do carvão mineral e de escórias siderúrgicas. **Tese (Doutorado em engenharia e ciência dos materiais)**, Programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

COSTA, Heloína Nogueira da; CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra; NOGUEIRA, Ricardo Emílio Ferreira Quevedo. Cimento álcali-ativado. In: **CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: princípios e fundamentos em pesquisa**. Vol. 2. [S.l.]: Editora Científica Digital, 2022. p. 13–29. ISBN 978-65-5360-230-4. DOI: 10.37885/221110900.

DUXSON, P.; LUKEY, G.C.; SEPAROVIC, F.; VAN DEVENTER, J.SJ. Effect of alkali cations on aluminum incorporation in geopolymeric gels. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 4, p. 832–839, 2005.

EL FADILI, Hamza; AIT-KHOUIA, Yassine; OUFFA, Nouredine; TAHA, Yassine; MOUKANAA, Samira; BENZAAZOUA, Mostafa. **Comprehensive review on alkaline dissolution of aluminosilicates and its role in the mechanisms and properties of geopolymers and alkali-activated materials**. *Case Studies in Construction Materials*, v. 23, e05330, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05330>

EL-NAGGAR, Mohamed R.; EL-DESSOUKY, Mohamed I. **Re-use of waste glass in improving properties of metakaolin-based geopolymers: Mechanical and microstructure examinations**. *Construction and Building Materials*, v. 132, p. 543–555, 2017.

FARHAN, Khatib Zada; JOHARI, Megat Azmi Megat; DEMIRBOĞA, Ramazan. Evaluation of properties of steel fiber reinforced GGBFS-based geopolymer composites in aggressive environments. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 345, 128339, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128339>.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 86, n. 1–3, p. 207–214, 2005.

GASPERI, Jessica de. **Medidas de trabalhabilidade em pastas geopoliméricas de metacaulim e sua correlação com propriedades e características reológicas**. 2021. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2021.

GÖRHAN, Gökhan; KÜRKLÜ, Gökhan. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. **Composites: Part B**, v. 58, p. 371–377, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.082>.

GUO, Siyao; WU, Yulin; JIA, Zhiqing; QI, Xiaoqiang; WANG, Wenrui. **Sodium-based activators in alkali-activated materials: Classification and comparison**. *Journal of Building Engineering*, v. 70, p. 106397, 2023.

HE Z.; ZHU X.; WANG J.; UM M.; WANG Y. Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 965-973, 2019.

HEWLETT, Peter C. (ed.). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2003.

HORVATINEC, Jelena *et al.* Recycling fly ash from coal or biomass combustion for nutrient recovery and enhanced food production in acidic agroecosystems: A multi-level meta-analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 221, p. 115925, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115925>.

IBRAHIM, Mohammed; MASLEHUDDIN, Mohammed. An overview of factors influencing the properties of alkali-activated binders. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 286, p. 124972, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124972.

JIAO, Zhenzhen; LI, Xueying; YU, Qinglin; YAO, Qinqin; GUAN, Xinchun; HU, Ping. **Chloride resistance of class C/class F fly ash-based geopolymer mortars with different strength grades**. *Case Studies in Construction Materials*, v. 18, e01811, 2023. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01811.

KANAAN, Dima; SOLIMAN, Ahmed M.; SAFHI, Amine el Mahdi. **External sulfate attack ambient-cured one-part alkali-activated self-consolidating concrete**. *Sustainability*, v. 15, n. 5, p. 4127, 2023.

KHATIB, L. M.; CLAY, R. M. **Absorption characteristics of metakaolin concrete**. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 1, p. 19-29, 2004.

KRYVENKO, P. (2017). Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials. **Journal of Ceramic Science and Technology**, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00042>

LIMA, Lucas Pereira; DIÓGENES, Daniel Gomes; CABRAL, Eduardo Bezerra; NOGUEIRA, Ricardo Emílio F. Q.; COSTA, Heloína Nogueira da. **Comportamento no estado fresco e no estado endurecido de argamassas álcali-ativadas à base de cinza volante curadas em temperatura ambiente**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 27, n. 3, 2022. DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0060.

LIN, Jinming; ZHANG, Yong; YANG, Zhengxian. **A review of recent advances in alkali-activated materials from silica-rich wastes derived sodium silicate activators**. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 21, p. 189–203, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3151/jact.21.189>.

LI, Qi; REN, Zhigang; SU, Xin; FENG, Yixuan; XU, Tianen; ZHENG, Zhiguo; LIU, Ye; LI, Peipeng. **Improving sulfate and chloride resistance in eco-friendly marine concrete: alkali-activated slag system with mineral admixtures**. Construction and Building Materials, v. 411, p. 134333, 2024.

LONGHI, Márlon A.; RODRÍGUEZ, Erich D.; WALKLEY, Brant; ZHANG, Zuhua; KIRCHHEIM, Ana Paula. **Metakaolin-based geopolymers: Relation between formulation, physicochemical properties and efflorescence formation**. Composites Part B: Engineering, v. 182, art. 107671, 2020. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107671.

MALONE, Philip G.; RANDALL Jr., Charlie A.; KIRKPATRICK, Thaddeus. Potential applications of alkali-activated alumino-silicate binders in military operations. Vicksburg: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1985. (Miscellaneous Paper GL-85-15).

TORRES, Ellen Mirley Medeiros. **UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA BSSF NA FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA ESTRUTURAL**. 2026. 121 f. Dissertação em processo de publicação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2026.

MENGER, Manuela Hoffmann. **Comportamento mecânico de compósitos contendo cimento álcali-ativado e microfibras metálicas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

METACAULIM DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. **Ficha técnica do Metacaulim HP Ultra**. Documento técnico. São Paulo, s.d. Disponível em: <https://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>.

MIYAMOTO, Takayuki; TORII, Koichi; AKAHANE, Kenichi; HAYASHIGUCHI, Sachiko. **Production and use of blast furnace slag aggregate for concrete**. Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report, n. 109, p. 102–108, jul. 2015.

MOHAJERANI, A.; SUTER, D.; JEFFREY-BAILEY, T.; SONG, T.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.; LAW, D. Recycling waste materials in geopolymer concrete. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v.21, p.493-515, 2019.

NASROLLAHZADEH, K.; ROSTAMI, M. **Experimental investigation on durability of one-part and two-part alkali-activated slag concretes in sulfuric acid environment: development of a durability index and CO₂ emission assessment**. Arabian Journal for Science and Engineering, 2025. DOI: 10.1007/s13369-025-10137-6

NIDHEESH, P. V.; KUMAR, M. S. An overview of environmental sustainability in cement and steel production. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 856–871, 2019.

ÖZBAY, E.; ERDEMIR, M.; DURMUS, H. I. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 105, p. 423–434, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153>.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review. Part2. About materials and binders manufacture. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1315-1322, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061807000918#bib9>

PINTO, A. T. **Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina de metacaulino**. Universidade do Minho (2004). Tese de doutorado

PONOMAR, V., LUUKKONEN, T., & YLINIEMI, J. (2023). Revisiting alkali-activated and sodium silicate-based materials in the early works of Glukhovsky. **Construction and Building Materials**, No. 14, pp. 132474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132474>.

PROVIS, John L. Alkali-Activated Materials, **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 40–48, 2018.

PROVIS, John L.; VAN DAVENTER, Jannie S. J. Alkali-Activated Materials: State-of-the-Art Report, **RILEM TC 224-AAM**. Springer, 2014.

PUTHIPAD, N.; OUCHI, M.; RATH, S.; ATTACHAIYAWUTH, A. Enhancement in selfcompactability and stability in volume of entrained air in self-compacting concrete with high volume fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 349-360, 2016.

RAMOS, Giovanni Antonio; SILVESTRO, Laura; PELISSER, Fernando. **Durabilidade de cimento geopolimérico composto com resíduo do polimento de porcelanato contra ataque de sulfato**. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO CIMENTO (SBCC)**, 2., 2025. Florianópolis. Florianópolis: SBCC, 2025.

RANJBAR, Navid; TALEBIAN, Sepehr; MEHRALI, Mehdi; KUENZEL, Carsten; METSELAAR, Hendrik Simon Cornelis; JUMAAT, Mohd Zamin. Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. **Composites Science and Technology**, v. 122, p. 73–81, 2016. DOI: 10.1016/j.compscitech.2015.11.009.

RANJBAR, Navid; ZHANG, Mingzhong. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 107, art. 103498, 2020. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103498.

RASHAD, Alaa M. **Metakaolin as cementitious material: History, scours, production, and composition – A comprehensive overview**. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 303–318, 2013.

SEVERO, C. G. S. *et al.* Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 8, n. 2, p. 55–67, 2013. Disponível em: <http://www.dema.ufcg.edu.br>.

SI, Ruizhe; DAI, Qingli; GUO, Shuaicheng; WANG, Jiaqing. **Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder**. *Journal of Cleaner Production*, v. 242, p. 118502, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118502.

SIDDIKA, Ayesha; HAJIMOHAMMADI, Ailar; MAMUN, Md. Abdullah Al; ALYOUSEF, Rayed; FERDOUS, Wahid. **Waste glass in cement and geopolymer concretes: a review on durability and challenges**. *Polymers*, v. 13, n. 13, p. 2071, 2021. DOI: 10.3390/polym13132071.

SILVA, Marina Carvalho da; RACANELLI, Lêda de Azevedo; SOUZA, José Antônio da Silva; QUARESMA, João Nazareno Nonato; CORRÊA, Matheus Silva. **Estudo do desempenho mecânico de geopolímero produzido com alto teor de ferro**. *Revista Matéria*, v. 28, n. 1, e20220309, 2023. ISSN 1517-7076.

SU, Peifeng; ENIOLA, Sunday; XIE, Jiankai; ZHAO, Xiang; UGBOAJA, Chigozirim; LI, Miaomiao; SI, Ruizhe; DAI, Qingli; FEI, Yuhuan; HU, Yun Hang. **Performance evaluation of glass powder as a partial precursor in alkali-activated slag (AAS) binder and recycled glass and steel fibers in AAS mortar**. *Construction and Building Materials*, v. 473, p. 140757, 2025.

TCHAKOUTÉ, Hervé K. *et al.* Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: A comparative study. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 114, p. 276–289, 2016.

TEODORO, Rodrigo; CASCUDO, Oswaldo; CARASEK, Helena. **Influência das características de diferentes tipos de metacaulim em propriedades mecânicas e absorção de água do concreto**. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 58., 2016, Belo Horizonte**. Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2016. Belo Horizonte: IBRACON, 2016. ISSN 2175-8182.

VARGAS, Alexandre Silva de. Cinzas volantes álcali-ativadas para a obtenção de aglomerantes especiais. **Tese (Doutorado em engenharia)**, Programa de pós-graduação de Minas, Metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

WAN, H.; YUAN, L.; ZHANG, Y. Insight Into the Leaching of Sodium Alumino-Silicate Hydrate (N-A-S-H) Gel: A Molecular Dynamics Study. **Frontiers in Materials**, v. 7, p. 1–11, 2020.

WANG, Xiaobo; KONG, Lijuan; ZHAO, Wenjing; LIU, Yazhou. **Chloride transport resistance of alkali-activated concrete exposed to combined chloride, sulfate and carbonation environments**. *Construction and Building Materials*, v. 367, art. 130353, 2023.

WANG, Y.; WANG, Z.; LEI, D.; ZANG, C.; GUO, D. **Technology verification of Portland cement clinker production driven by concentrated solar energy directly**. *Renewable Energy*, v. 232, p. 121064, 2024.

WARDHONO, Arie; RISDIANTO, Yogie; SABARIMAN, Bambang; HIDAJATI, Ninik Wahyu; ANDAJANI, Nur. **The effect of sodium silicate to NaOH ratio on strength development of fly ash geopolymer mortar in marine environment**. *E3S Web of Conferences, Les Ulis*, v. 445, p. 01005, 2023. DOI: 10.1051/e3sconf/202344501005.

YANG, Tao; ZHANG, Zongjin; ZHU, Hong; LI, Xiangming. **Effect of waste glass powder on the microstructure and properties of metakaolin-based geopolymers**. *Construction and Building Materials*, v. 269, p. 121274, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121274.

ZHANG, Binyu; HE, Pingping; POON, Chi Sun. **Optimizing the use of recycled glass materials in alkali activated cement (AAC) based mortars**. *Journal of Cleaner Production*, v. 255, p. 120228, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120228.

ZHANG, J., SHI, C., ZHANG, Z., & OU, Z. (2017). **Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies**. *Construction and Building Materials*, 152, 598-613. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.027>

ZHOU, Yangmei; JI, Yongsheng; XUE, Qi; DAI, Guangmin; XU, Shengnan. **Establishment of a prediction model for the compressive strength of alkali-activated fly ash and ground granulated blast furnace slag**. *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 480, p. 141556, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141556.